Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. Hermann J. Knüttgen

Verhalten der Wärmebilanzgrößen bei 35tägigem Aufenthalt in künstlichem feuchtheißem Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Jacob Ladipoh
aus Freetown/Sierra Leone

1969

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547613_0058

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. Hermann J. Knüttgen

Verhalten der Wärmebilanzgrößen bei 35tägigem Aufenthalt in künstlichem feuchtheißem Klima

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Jacob Ladipoh
aus Freetown/Sierra Leone

1969

Gedruckt mit Unterstützung
des Deutschen Akademischen Austausch-Dienstes

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. W. Graumann

1. Berichterstatter: Dozent Dr. W. Höfler
2. Berichterstatter: Professor Dr. H.J. Knüttgen

FOTODRUCK PRÄZIS Barbara v.Spangenberg KG · Tübingen

Meinen Eltern

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

A.	Einleitung und Literatur	1
B.	Fragestellung	5
C.	Methodik	6
D.	Ergebnisse	7
E.	Zusammenfassung der Ergebnisse	14
F.	Diskussion der Ergebnisse	15
G.	Literaturverzeichnis	17

A. EINLEITUNG UND LITERATUR

Der menschliche Körper kann nur in einem engen Temperaturbereich die Lebensfunktionen aufrechterhalten; er gehört also zu den homoiothermen Organismen. Man unterscheidet zwischen dem wärmeren Körperkern (65 %) und der kühleren Schale (35 %) (BAZETT 1949, BÜNING 1963). Nach Untersuchungen von MINARD u. COPMAN 1963, LEITHEAD u. LIND 1964 liegt die Körpertemperatur für Männer bei $36,8^{\circ} \pm 0,06$, für Frauen bei $37,0^{\circ} \pm 0,14$ (Zyklusschwankung) in ruhigem, nüchternem Zustand. Steigt die Kerntemperatur über 41° oder fällt sie unter $34^{\circ}C$, wird die Funktion des Wärmezentrums gestört. Die Letalgrenze nach oben liegt um $44^{\circ}C$ und die untere um $24^{\circ}C$.

Kerntemperaturanstieg kann durch "äußere Wärmebelastung" (WENZEL 1961), durch Wärmestrahlung oder Wärmeleitung, hervorgerufen werden, wenn die Umgebungstemperatur höher als die Hauttemperatur liegt. Durch "innere Wärmebelastung" kann sie auch steigen; z.B. treten bei Arbeit etwa 80 % des Stoffwechselumsatzes als Wärme in Erscheinung.

Um die Kerntemperatur nicht zur Letalgrenze steigen zu lassen, muß ein Wärmetransport von Kern zur Schale und dann in die Umgebung gewährleistet sein. Eine Arbeitsleistung von 10 Kcal/min kann innerhalb von 30 Minuten die Kerntemperatur von Normalwerten auf lebensgefährliche Temperaturen steigern (LEITHEAD u. LIND 1964, LEHMANN 1965).

Der Wärmetransport vom Kern zur Schale geschieht ausschließlich durch Konvektion. Als Transportmittel dient das Blut. Bei einem Temperaturunterschied von einem Grad Celsius kann ein Kubikzentimeter Blut eine Grammkalorie Wärme aus einem Kubikzentimeter Muskel oder Organmasse abtransportieren. Die Blutmenge, die zur Sauerstoffversorgung notwendig ist, reicht auch aus, um die im Körperinnern erzeugte Wärme aufnehmen zu können (LEHMANN 1965). Die aufgenommene Wärme kann in der Schale gespeichert und über die Hautoberfläche beim Durchströmen der Hautgefäße wieder abgegeben werden. Bei Zimmertemperatur von $18^{\circ}C$ besteht ein Temperaturgradient zwischen Blut und Hauttemperatur von ca. $6,6^{\circ}C$ (EICHNA et al. 1950).

Die Größe des Wärmetransports hängt sowohl vom peripheren Blutstrom als auch vom Temperaturgradienten zwischen Kern und Schale ab (ROBINSON et al. 1955, nach EPPERLEIN). Ein Anstieg der Hauttemperatur verringert diese Größe. Soll der Körper noch in der Lage sein, die nötige Wärmemenge vom Kern zur Schale abzutransportieren, muß die Hauttemperatur mindestens ein Grad Celsius unter der Kerntemperatur liegen. Sonst steigt die Kerntemperatur unaufhaltsam an (LEHMANN 1965).

Durch vermehrten Reiz auf die Wärmerezeptoren und verminderten Reiz auf die Kälterezeptoren der Haut kommt es zum Nachlassen des Vasokonstriktorentonus der Gefäße (EDHOLM, FOX u. MACPHERSON 1956). Dieser Mechanismus verbessert die Wärmeabgabe an die Hautoberfläche. Eine Entwässerung des Unterhautbindegewebes erleichtert auch den Wärmeaustausch zwischen Blut und Hautoberfläche (BÜNING 1963).

Die verschiedenen Möglichkeiten der Wärmeabgabe trennen sich erst auf der Körperoberfläche. Der Austausch von Wärme zwischen Körperoberfläche und Umgebung geschieht zunächst immer durch Strahlung und Leitung. Die Größe der Wärmeabgabe hängt von Außentemperatur und Luftbewegung ab. Bei zunehmender Außentemperatur ändert sich die durch Strahlung abgegebene Wärmemenge mit der vierten Potenz der Differenz zwischen Haut und Umgebung. Die Ableitung von Wärme durch Konvektion hängt von der Außentemperatur in einem linearen Verhältnis ab, von der Veränderung der Luftbewegung proportional der Quadratwurzel der Geschwindigkeit (HÖFLER 1963). Solange die Umgebungstemperatur die Hauttemperatur nicht übersteigt, erfolgt Wärmeabgabe durch Strahlung und Leitung. Andernfalls wird auf diesen Wärmeaustauschwegen Wärme vom Körper aufgenommen.

Strahlung	$qs = s \cdot e \left(T_H^4 - T_W^4 \right)$	Stefan-Boltzmann's Gleichung
Konvektion	$Q = K \left(T_K - T_H \right)$	

Die Verdunstung von Schweiß bleibt die einzige Möglichkeit, bei höheren Temperaturen Wärme von der Körperoberfläche abzugeben. Ein Liter verdunsteter Schweiß kann dem Körper eine Wärmemenge von ca. 600 Kcal entziehen (GAGGE 1940, LEHMANN 1965, LEITHEAD u. LIND 1964), etwa das Siebenfache des Grundumsatzes eines Mannes mit zwei Quadratmetern Körperoberfläche. Bei niedrigen Haut- und Umgebungstemperaturen besteht schon eine perspiratio insensibilis, wobei jedoch der Flüssigkeitsverlust nicht 10 - 20 g/h übersteigt (LIST 1958).

Die Schweißproduktion durch die ekkrinen Drüsen der Haut beginnt bei einer Außentemperatur von ca. 32°C langsam anzusteigen (WINSLOW u. HERRINGTON 1949, HERTZMAN et al. 1952, HÖFLER 1963). Diese Schwitzgrenze ist von der Kerntemperatur (McARDLE 1945) sowie von der Hauttemperatur (HERTZMAN et al. 1951) abhängig.

Es wird allgemein anerkannt, daß die Zunahme der Schweißmenge der entscheidende Faktor bei der Hitzeakklimatisation ist (BEAN u. EICHNA 1943, ROBINSON et al. 1943, TAYLOR et al. 1943, LADELL 1951, BELDING u. HATCH 1963). LADELL fand eine Zunahme der Gesamtschweißmenge von 1100 g am 1. Tag auf 1560 g am 9. Tag als Mittel aus den Ergebnissen von 17 Versuchspersonen mit einem Durchschnittskörpergewicht von 65 kg. Die Hälfte der Zunahme fand in den ersten drei Tagen statt. Die danach folgende Vermehrung des Schweißverlustes kam dadurch zustande, daß die Vp bei einer niedrigeren Rectaltemperatur zu schwitzen begannen, oder daß sie bei einer bestimmten Rectaltemperatur mehr Schweiß produzierten. LADELL betont, daß "eine der ersten Veränderungen während der Akklimatisation an Hitzearbeit eine Erniedrigung der Rectalschwellentemperatur für den Schwitzbeginn ist" (so auch McARDLE 1944). Dabei fiel auf, daß die Versuchspersonen dreimal so viel Schweiß produzierten, als sie verdunsten konnten, ja, daß am Ende des Akklimatisationsversuches der Betrag an nicht verdunstetem Schweiß eher noch zugenommen hatte. Diese übergroße Zunahme der Schweissekretion kann damit zusammenhängen, daß die Körperoberfläche wahrscheinlich nicht gänzlich befeuchtet wird, ehe die Schweißmenge nicht mindestens doppelt so groß geworden ist wie die maximale Schweiß-

verdunstung

$$E_{max} = 1/2 \; S \text{ od } S = 2 \, E_{max} .$$

Der Schweißverlust durch Abtropfen beginnt schon, wenn die Schweißmenge erst 1/3 der maximalen Schweißverdunstung beträgt (Modellversuche KERSLAKE 1963), denn die Schweißproduktion ist keineswegs gleich groß über der ganzen Körperoberfläche (WEINER 1945).

Im heißen Klima verlangt die Aufrechterhaltung der Wärmebilanz nicht nur eine zunehmende Schweißproduktion. Es kommt auf die Größe der Schweißverdunstung an. Die Verdunstungsgröße hängt ab vom Dampfdruckgefälle zwischen Hautoberfläche und Umgebung sowie von der Luftgeschwindigkeit (NELSON et al. 1947, CLIFFORD et al. 1959). Die Luftbewegung erneuert ständig die voll wasserdampfgesättigte Luftschicht über der Hautoberfläche. Bei einer entsprechenden Windgeschwindigkeit kann auch bei voll wasserdampfgesättigter Luft noch eine Verdunstung erreicht werden, wenn die direkt über der Hautoberfläche liegende Luftschicht durch die Hauttemperatur erwärmt wird und dadurch ein neues Sättigungsdefizit hergestellt werden kann. Die Verbesserung der Verdunstung durch zunehmende Windgeschwindigkeit ist aber begrenzt. Bei einer Lufttemperatur von 48,9° C und einer Feuchttemperatur von 29,4°C liegt das Optimum bei 100 ft/min (LEITHEAD u. LIND 1964). Die Verdunstungskapazität nimmt wieder ab bei einer weiteren Steigerung der Luftzufuhr. Die Wärmezufuhr wird dann durch Konvektion begünstigt (HÖFLER 1963).

B. FRAGESTELLUNG

Im Verlauf der Akklimatisation an Hitzearbeit in einem feuchtheißen Klima wird die Schweißmenge etwa verdoppelt (LADELL 1951). Ein großer Teil der produzierten Schweißmenge tropft aber unverdunstet ab (KERSLAKE 1963). Es ist daher gelegentlich bezweifelt worden, ob die Zunahme der Schweißmenge überhaupt ein sinnvoller und wirksamer Vorgang ist unter Klimabedingungen, bei denen schon die vom Nichtakklimatisierten produzierte Schweißmenge "nutzlos abläuft" (LEHMANN 1965, HENSEL 1963).

Um diese Frage beantworten zu können, müßte man die tatsächlich verdunstete Schweißmenge kennen und ihre Beziehung zu der produzierten Schweißmenge untersuchen.

Die Gesamtschweißmenge läßt sich einfach durch Wiegen der Versuchsperson messen. Eine Schätzung der verdunsteten Schweißmenge kann durch eine Wärmebilanzrechnung versucht werden. Die so gewonnenen Werte lassen sich kontrollieren, wenn man bestimmt, welche Schweißmenge unter den Versuchsbedingungen (Klima und Hauttemperatur) maximal verdunsten kann (= Verdunstungskapazität).

C. METHODIK

Die männliche Versuchsperson, ein 25 Jahre alter, 83,0 kg schwerer, 189 cm großer Mitteleuropäer, der vor dem Versuch keine Zeichen von Hitzeakklimatisation aufwies, hielt sich 35 Tage lang in einer Klimakammer auf.

An 10 Tagen vor Beginn des Versuchs wurde das gleiche Arbeitsprogramm von 4 x 40 Minuten bei normaler Zimmertemperatur absolviert.

Während des Hauptversuchs lagen von 8^{00} bis 18^{00} Uhr die Trockentemperaturen zwischen 36,0°C und 37°C (Mittelwert 36,5°C) und die Feuchttemperaturen zwischen 30,0°C und 32,5°C (Mittelwert 31,3°C). Für die relative Feuchte wurden durchschnittlich 69 % gemessen (66 % bis 73 %). Die Effektivtemperatur betrug 32,3°C.

Abends um 18 Uhr wurde die Trockentemperatur innerhalb 2 Stunden auf 31,5°C erniedrigt. Die relative Feuchte während der Nacht betrug ca. 69 %. Am 34. Versuchstag wurde durch Erhöhung der Feuchttemperatur auf durchschnittlich 32,9°C die relative Feuchte bis auf 77 % gesteigert, um die Reaktion des akklimatisierten Organismus auf diese Erschwerung der Verdunstungsbedingungen zu beobachten.

Nach dem Frühstück zwischen 8 und 9 Uhr wurden zwischen 10^{00} und 10^{30} die Ruhewerte von Puls, Temperaturen und Blutdruck im Sitzen gemessen. Dann folgten vier Zyklen von je 40 Minuten Arbeit auf einem Fahrradergometer bei 8 mkp/s (bei 60 Umdrehungen in der Minute) und 15 Minuten Ruhe. Die Pulsfrequenz in Ruhe und Arbeit wurde alle 5 Minuten mit dem fotoelektrischen Pulszähler nach E.A.Müller gemessen.

Mundtemperatur und Hauttemperatur an Stirn, Brust, Handrücken und Oberschenkel wurden alle 5 Minuten mit fixierten Thermoelementen (Ellab, Kopenhagen) gemessen. Die anfangs ebenfalls gemessene Trommelfelltemperatur konnte leider nicht ausgewertet werden, da das Thermoelement während des Versuchs unbrauchbar wurde.

Vor jeder Arbeit, am Ende der zugehörigen Ruheperiode, wurde die Versuchsperson auf 50 g genau gewogen, um jeweils die Schweißmenge zu ermitteln. Während der Ergometerarbeit wurden 2/3 des Wasserverlustes (Gewichtsverlust) der vorangegangenen Stunde durch dünnen körperwarmen Tee ersetzt. Außerdem wurden in jeder Ruhepause 2 saure Gurken gegessen.

D. ERGEBNISSE

I. Verlauf der Gesamtschweißmenge im 35-tägigen Akklimatisationsversuch

Die Schweißproduktion S wurde aus den Gewichtsdifferenzen vor und nach den einzelnen Arbeiten unter Berücksichtigung der aufgenommenen Flüssigkeitsmenge (ml/h) errechnet, nachdem die Vp abgetrocknet worden war. Dabei wurde das sp. Gewicht des Schweisses dem des Wassers gleichgesetzt. Die Größe wurde mit 580 multipliziert

$$\text{also} \quad S = (\text{ml/h}) \cdot 580 = \text{Kcal/h}$$

Gesamtschweißmenge S, verdunstete Menge V und Verdunstungskapazität C wurden jeweils nur für die ersten drei Stunden berechnet.

Die Schweißmenge des ersten Tages war gering - durchschnittlich 690 Kcal/3h. Am 5. Tag waren es 1110 Kcal/3h und am 18. Tag 1460 Kcal/3h, also eine Verdoppelung am 18. Tag gegenüber der Schweißmenge der ersten 3 Tage (Abb. 1).

Die Schweißmengen des ersten Tages wurden in 35 Tagen für die 1. Stunde annähernd, in der 2. bis 4. Stunde mehr als verdoppelt. Übereinstimmend mit der Literatur (KUNO 1956, LADELL 1957, SCHMOLL 1966) kann festgestellt werden, daß die Schweissekretion während der Akklimatisation um mehr als 100 % ansteigt.

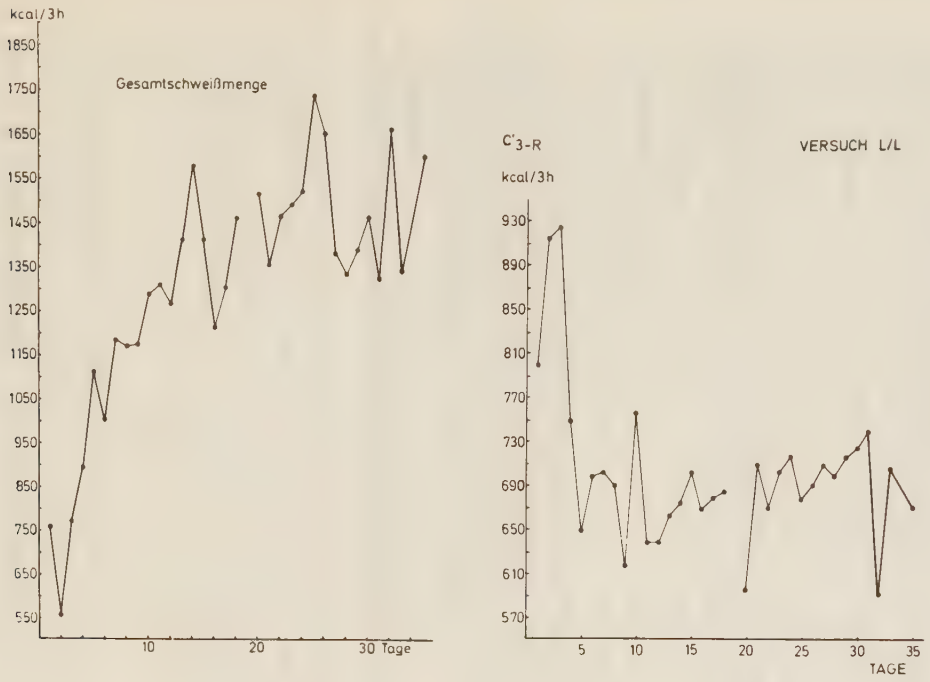

Abb. 1

Änderung der Schweissmenge und der maximalen Verdunstung (Verdunstungskapazität) im Laufe der Akklimatisation.

Am Anfang war die Schweißbildung am stärksten in der 1. Stunde. Nach etwa 2 Wochen wird die Schweißproduktion in der 2. Stunde größer als in der 1. Stunde. Diese Verschiebung des Schweißproduktionsmaximums in die 2. Stunde hat STRYDOM 1966 unter etwas höherer Klimabelastung schon nach 10 Tagen erreichen können.

Die Summe der Schweissekretion aller drei Arbeiten steigt jeden Tag um etwas über 100 ml/3h bis zum 18. Tag, also um etwa 115 % in 2 1/2 Wochen. Im weiteren Verlauf liegen einzelne Werte entsprechend den klimatischen Schwankungen weit über dem durchschnittlichen Niveau. Nach dem 18. Tag wurde durchschnittlich nicht mehr geschwitzt als an diesem Tag, den 34. Tag ausgenommen.

II. Die Wärmebilanzgleichung

Die verdunstete Schweißmenge ("Verdunstungsgröße" V) wurde für jede der 3 Stunden getrennt aus der Wärmebilanzgleichung berechnet:

$$V = M \pm Q_{cs} \pm \Delta H \quad \text{(Kcal/h)} \qquad (1)$$

M = Gesamtstoffwechsel (Grundumsatz 75 Kcal/h + Arbeitsstoffwechsel bei 25 %igem Wirkungsgrad = 170 Kcal/h) = 245 Kcal/h

Q_c = Konvektionswärmestrom nach CLIFFORD et al. 1959,

$$= 0{,}23 \text{ Wind } 0{,}62 \, (t_{Haut} - t_{Luft}) \text{ Kcal/h} \cdot m^2 \qquad (2)$$

Für den Strahlungswärmestrom Q_s kann bei der Berechnung die einfache Temperaturdifferenz zwischen Haut und Wänden (in unseren Versuchen = Luft) eingesetzt werden. Unter der vernünftigen Annahme, daß etwa 82 % der Körperoberfläche am Strahlungswärmeaustausch teilnehmen, ergibt sich eine fast gleiche Proportionalitätskonstante wie für den Konvektionswärmestrom, so daß wir beide Wärmeströme zusammenfassen können zu

$$Q_{cs} = 16 \, (t_{Haut} - t_{Luft}) \text{ Kcal/h} \qquad (3)$$

Die Wärmeinhaltsänderung ΔH wurde aus Körpergewicht, der spezifischen Wärme von 0,83 und der Änderung der Kerntemperaturen während der Arbeiten berechnet. Es ergibt sich somit für die verdunstete Schweißmenge ein Betrag von

$$V = 245 \pm 16 \, (t_{Haut} - t_{Luft}) \pm 68 \, T_{Kern} \text{ (Kcal/h)} \quad (4)$$

Für die Summe aller drei Stunden ergab sich folgende Formel:

$$V = 3 \, M \pm Q_{1+2+3} \pm 68 \, (K_3 - R_1) \quad (5)$$

$Q_{1,2,3}$ sind die Werte von $Q_{c,s}$ in den einzelnen Stunden.

$K_3 - R_1$ = Kerntemperatur der dritten Stundenarbeit minus Kerntemperatur in der ersten Ruhe.

III. Verhalten der Wärmespeicherung ΔH (Abb. 2)

Für die einzelnen Stunden wurde $\Delta H = 68 \, (\Delta T_{Kern})$ aus den Mittelwerten der Kerntemperatur vor und unmittelbar nach den einzelnen Arbeiten berechnet, für alle 3 Stunden gemeinsam aus den Mittelwerten der Ruheperiode vor der ersten und unmittelbar nach der letzten Arbeit.

In den ersten 8 Tagen stieg die Kerntemperatur kontinuierlich von Stunde zu Stunde um insgesamt 0,9 - 1,7°C. In den letzten 5 Tagen betrug der Anstieg nur noch 0,2 - 0,8°C, und das Maximum der Kerntemperatur wurde häufiger bereits in der 2. Stunde erreicht.

Die Wärmespeicherung der 1. Stunde (ΔH_a) stieg im Laufe der Akklimatisation von 20 - 80 auf 60 - 100 Kcal/h. Die Wärmespeicherung der 2. Stunde (ΔH_b) fiel von etwa 40 auf etwa 20 Kcal/h, die der 3. Stunde (ΔH_c) von etwa 20 - 40 auf $\pm$ 0 Kcal/h.

Die gesamte Wärmespeicherung während der 3 Stunden ΔH_{3-R} zeigte dementsprechend keine sichere Veränderung. Der Mittelwert der ersten 9 Tage beträgt 102 Kcal/3h, in den letzten 9 Tagen 92 Kcal/3h. Es findet also lediglich eine Verschiebung der gesamten Wärmespeicherung auf die 1. Arbeitsstunde statt. Doch spielt sich dieser Vorgang dank der verbesserten Wärmeabgabe bei einer um etwa 1°C niedrigeren Körpertemperatur ab.

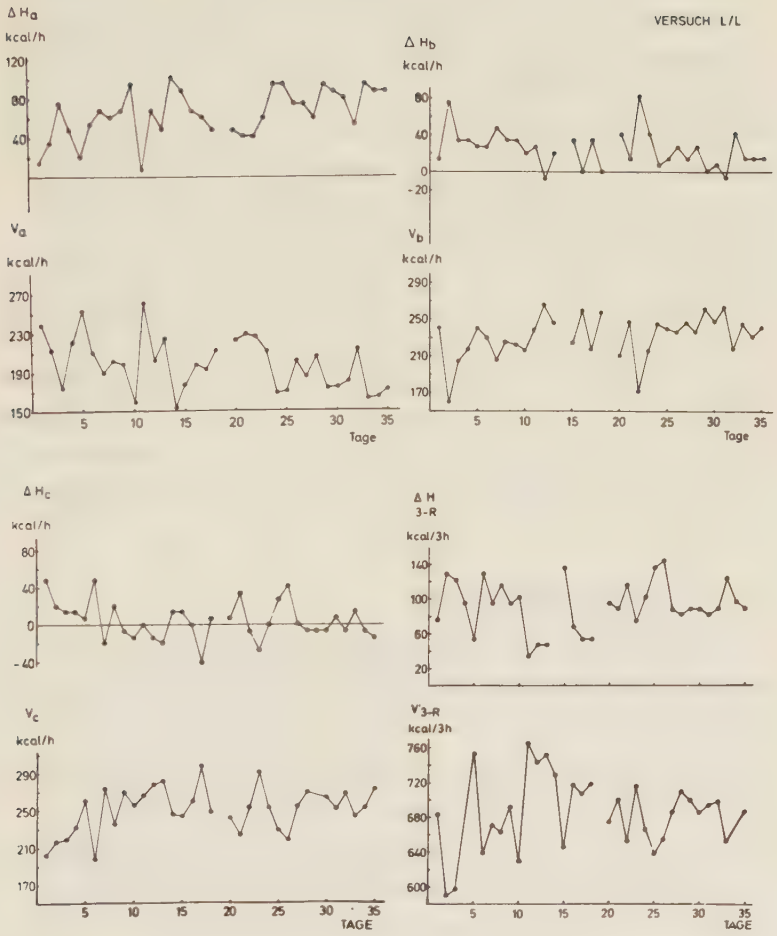

Abb. 2
Änderung der Wärmespeicherung Δ H und der Verdunstungsgrösse V im Laufe der Akklimatisation.
a, b, c: Werte der 3 Arbeitsperioden.
3 - R: Werte aller 3 Stunden zusammen.

IV. Änderung der Wärmeaufnahme aus der Umgebung $Q_{c,s}$ (Abb. 3,4)

Die Berechnung dieses Summanden ist in Abschnitt II. angegeben. Nur in den ersten 10 Tagen lag die Hauttemperatur in insgesamt 9 Stunden über der Umgebungstemperatur. In diesen wenigen Stunden konnten geringe Wärmebeträge von höchstens 18 Kcal/h durch Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgeführt werden. Mit dem Abfall der Hauttemperatur im Laufe der Akklimatisation wurde nach dem 10. Tag auf diesen Wegen nur noch Wärme zugeführt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Arbeitsstunden sind nicht sehr groß. Der Gesamtbetrag für alle 3 Stunden Q_{a+b+c} lag in den ersten 3 Tagen bei $\pm$ 0 und stieg dann unter größeren Schwankungen steil an. Vom 15. Tag an wurde während der 3 Arbeiten eine Wärmemenge von etwa 45 Kcal/3h aufgenommen. In dieser Hinsicht ist also eine Erschwerung der Situation eingetreten. Da der Akklimatisierte bei niedrigerer Hauttemperatur mehr Wärme aus der Umgebung aufnimmt als der Unakklimatisierte mit seiner höheren Hauttemperatur, muß seine Verdunstungswärmeabgabe um diesen Betrag gesteigert werden.

V. Die Verdunstungsgröße V

Aus der Wärmeproduktion und den bisher dargestellten Größen H und $Q_{c,s}$ läßt sich nach (4) bzw. (5) die evaporative Wärmeabgabe berechnen.

Die Verdunstungsgröße der 1. Stunde V_a fiel langsam von etwa 210 Kcal auf 180 - 190 Kcal/h in den letzten 10 Tagen.

Die Verdunstungsgröße der 2. Stunde V_b betrug in den ersten 3 Tagen durchschnittlich 200 Kcal/h, stieg dann rasch an und lag in den letzten 10 Tagen bei etwa 240 Kcal/h.

Den deutlichsten Anstieg zeigt die Verdunstungsgröße der 3. Stunde V_c. Sie betrug in den ersten drei Tagen durchschnittlich 210 Kcal/h, erreichte rasch ein Maximum bei etwa 260 und hielt sich in den letzten zehn Tagen bei 250 Kcal/h.

Die gesamte evaporierte Wärmeabgabe aller drei Stunden V_{3-R} hatte in den ersten 3 Tagen durchschnittlich 620 Kcal/3h betragen, stieg dann unter großen Schwankungen auf ein Maximum

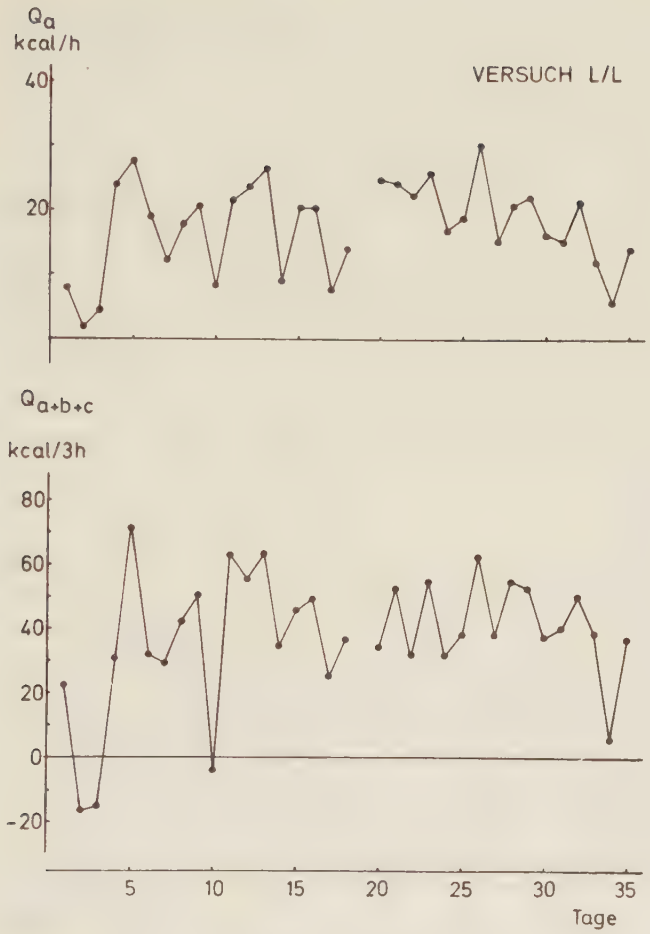

Abb. 3

Änderung des Konvektions- und Strahlungswärmestroms Q im Laufe der Akklimatisation für die 1. Arbeit und für alle 3 Arbeiten zusammen.

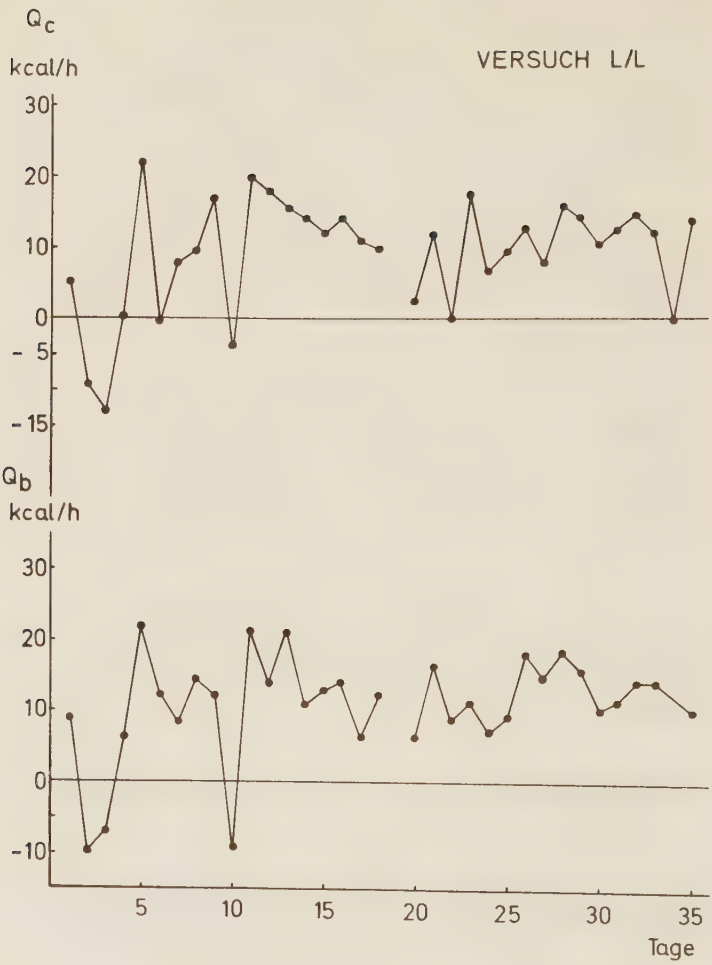

Abb. 4

Änderung des Konvektions- und Strahlungswärmestroms Q im Laufe der Akklimatisation für die 2. und 3. Arbeit

von 740 Kcal/3h zwischen dem 10. und 14. Tag und bewegte sich in den letzten 10 Tagen um 680 Kcal/3h.

Insgesamt hat also die evaporative Wärmeabgabe im Laufe der Akklimatisation nur um einen verhältnismäßig geringen Betrag von etwa 60 Kcal/3h zugenommen, d.h. um knapp 10 %. Dieser Betrag kompensiert die wegen der fallenden Hauttemperatur auf 45 Kcal/3h angestiegene Wärmeaufnahme durch Konvektion und Strahlung, während der Akklimatisationseffekt im Sinne einer Verminderung der Wärmespeicherung minimal ist.

Die Schätzung der Wärmebilanz scheint also die Meinung zu bestätigen, daß bei der Akklimatisation im feuchtheißen Klima der Anstieg der Schweißmenge um mehr als das Doppelte keinen sehr großen Nutzen hat. Ein besseres Verständnis des Akklimatisationsprozesses läßt sich jedoch gewinnen, wenn auch die maximal mögliche evaporative Wärmeabgabe, die Verdunstungskapazität C in die Betrachtung einbezogen wird.

VI. Die Verdunstungskapazität C

Die evaporative Wärmeabgabe hängt ab vom Wasserdampfdruck auf der Haut und in der Luft:

$$V = K (e_{Haut} - e_{Luft}) \text{ Kcal/h} \cdot m^2$$

Die Verdunstungszahl K wurde von CLIFFORD et al. 1959 bestimmt zu $K = 0{,}45 \cdot Wind^{0{,}63}$ Kcal/h $\cdot m^2 \cdot$ Torr.

Die durchschnittliche Luftbewegung in unmittelbarer Nähe der Vp beim Radfahren wurde mit 0,5 m/s (100 ft/min) gemessen. Bei einer Körperoberfläche von 2 m^2 ergibt sich damit eine Verdunstungskapazität von

$$C = 16{,}4 (E_{Haut} - e_{Luft}) \text{ Kcal/h.}$$

Es erwies sich aber, daß die aus der Wärmebilanz geschätzte Verdunstungsgröße V am Ende der Akklimatisation meist höher war als die Verdunstungskapazität C, was nicht möglich ist. Zur Korrektur wurde der Mittelwert aller Quotienten V/C berechnet. Mit diesem Faktor wurden die Werte von C multipliziert, so daß sich im Mittel keine Quotienten $V/C > 1{,}0$ ergaben.

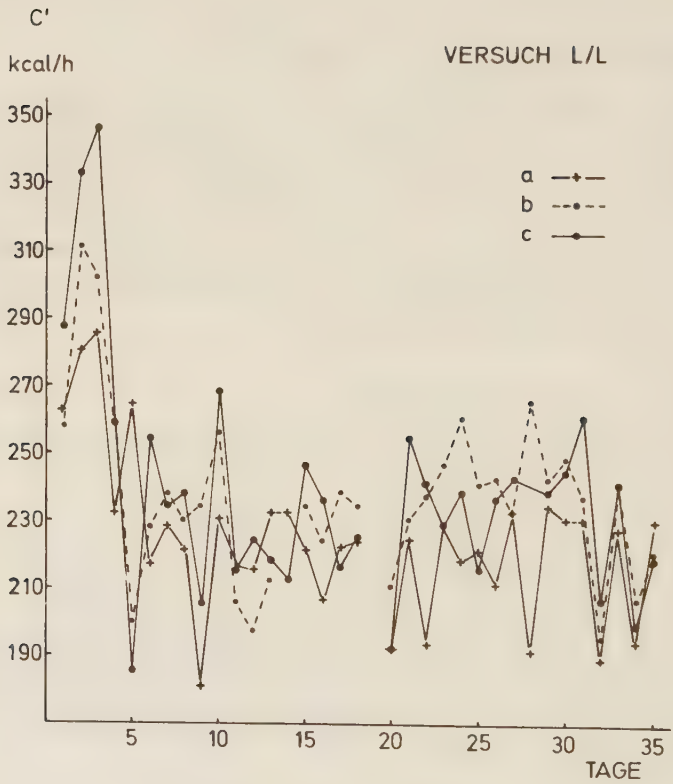

Abb. 5

Änderung der Verdunstungskapazität C im Laufe der Akklimatisation für die 3 Einzelstunden (Summe der 3 Stunden zusammen, s. Abb. 1).

Die korrigierte Berechnung von C lautet dann

$$C = 19{,}7\ (E_{Haut} - e_{Luft})\quad \text{Kcal/h.}$$

In allen drei Stunden wurden die höchsten Werte von C an den ersten 3 Tagen gefunden. Entsprechend der etwas niedrigeren Hauttemperatur war C in der 1. Stunde an jedem Tag am niedrigsten. Zwischen 2. und 3. Stunde ergaben sich keine sicheren Unterschiede (Abb. 5).

Die Verdunstungskapazität für alle 3 Stunden $C_{3\text{-}R}$ (Abb. 1) hatte an den 3 ersten Tagen 800 - 920 Kcal/3h betragen und stellte sich dann rasch auf einen durchschnittlichen Wert von 690 Kcal/3h ein. Das heißt aber, daß sich im Laufe der Akklimatisation die Verdunstungsbedingungen verschlechtert haben.

VII. Die Beziehung zwischen Schweißmenge S, Verdunstungsgröße V und Verdunstungskapazität C

Wenn es im Laufe der Akklimatisation bei zunehmender Schweißproduktion zu einer Verschlechterung der Verdunstungsbedingungen kommt, dann muß der Anteil der nicht verdunsteten Schweißmenge stark ansteigen. Der im oberen Teil der Abb. 6 dargestellte zeitliche Verlauf des Quotienten S/V während der 35-tägigen Akklimatisation zeigt, daß dies tatsächlich zutrifft. Entsprechend dem sehr feuchten Klima schwitzte die Vp schon an den ersten 3 Tagen etwas mehr, als sie verdunsten konnte. Im weiteren Verlauf steigt der Quotient kontinuierlich an und stellt sich vom 20. Tag an bei etwa 2,20 ein. Trotzdem läßt sich zeigen, daß die Steigerung der Schweißproduktion nicht nutzlos war.

Trägt man die Quotienten V/C gegen die zugehörigen Werte S/C auf (unterer Teil der Abb. 6), so erkennt man eine gesetzmäßige Beziehung zwischen beiden Größen. Zur Verdeutlichung ist die Linie eingetragen, auf der die Werte liegen müßten, wenn der gebildete Schweiß ganz verdunsten könnte. Bei den niedrigen Werten S/C der ersten 3 Tage liegen die Quotienten V/C tatsächlich in der Nähe dieser Linie. Einem durchschnittlichen S/C von 0,80 entspricht ein durchschnittliches V/C von 0,71. Etwa 11 % des gebildeten Schweißes konnten nicht verdunsten. Diese

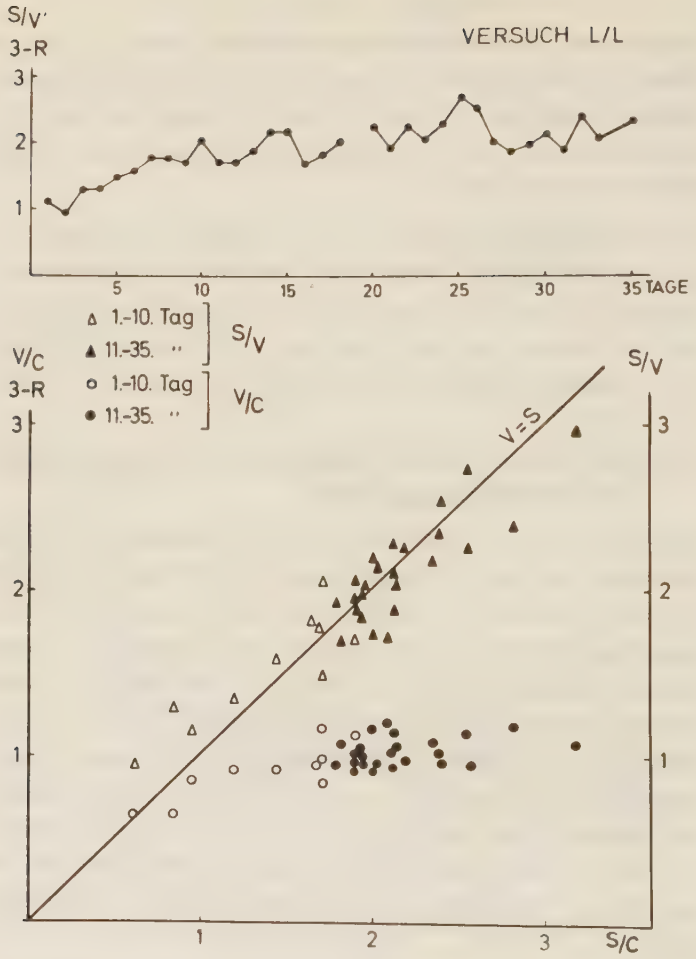

Abb. 6

Änderung des Quotienten S/V (alle 3 Stunden) im Laufe der Akklimatisation (oben).
Beziehung zwischen den Grössen V/C bzw. S/V zur Grösse S/C zu Beginn und am Ende des Akklimatisationsversuchs (vgl. Text).

Menge genügte aber offenbar nicht für eine vollständige Befeuchtung der Haut, die maximal mögliche Verdunstung wurde nicht erreicht. In den folgenden 5 Tagen beträgt V/C durchschnittlich 0,96, S/C 1,58. Obwohl jetzt schon fast 65 % des produzierten Schweißes über die Körperoberfläche abfließen, ist die Hautfeuchte noch nicht ganz ausreichend. Erst nach dem 10. Tag liegt bei einem durchschnittlichen S/C von 2,4 der Quotient V/C um 1,0.

Die in Abb. 6 ebenfalls eingetragenen Werte von S/V lassen erkennen, daß bei einer Schweißmenge $S < 0{,}6$ C der produzierte Schweiß voll verdunsten könnte (S/V strebt dem Wert 1,0 zu). Bei größeren Schweißmengen tropft ein zunehmender Anteil unverdunstet ab, dessen Größe dem Abstand der beiden Kurven entspricht.

E. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

1) Die Gesamtschweißmenge S stieg bis zum 18. Tag um etwas mehr als 100 ml/3h täglich und nahm dabei um insgesamt 115 % des Ausgangswertes zu. Später schwankt S entsprechend den täglich etwas variierenden klimatischen Verhältnissen.

2) Die während der 3 Arbeitsstunden eintretende Wärmespeicherung H nahm in 35 Tagen von 102 auf 92 Kcal/3h ab (nicht signifikant). Dieser Vorgang spielte sich jedoch am Ende der Akklimatisation bei einer um etwa $1^{o}C$ niedrigeren Körpertemperatur ab.

3) Die Wärmeaufnahme aus der Umgebung $Q_{s,c}$ stieg infolge des Abfalls der Hauttemperatur von $\pm$ 0 auf 45 Kcal/3h.

4) Die Verdunstungsgröße V stieg von 620 auf 680 Kcal/3h, obwohl sich die maximal mögliche Verdunstungskapazität C erheblich verschlechtert hatte.

5) Das Verhältnis von Schweißmenge zu Verdunstung S/V stieg von 1,1 auf durchschnittlich 2,4. Erst diese starke Steigerung der Schweißbildung ermöglicht eine für maximale Verdunstung ausreichende völlige Befeuchtung der Haut.

F. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Beurteilt nach dem zeitlichen Verlauf von Schweißmenge, Körpertemperaturen und Pulsfrequenz erfolgte die Akklimatisation im hier dargestellten Versuch in 3 Phasen. In den ersten 3 - 4 Tagen sind die Veränderungen gering. Dann folgt eine Phase rascher und ausgiebiger Änderungen der gemessenen Größen (hier ablesbar an der Gesamtschweißmenge, Abb. 1). Etwa vom 20. Tag an finden nur noch geringe Veränderungen im Sinne einer zunehmenden Angleichung der einzelnen Arbeitsstunden aneinander statt.

In den meisten Versuchen anderer Autoren (LADELL 1951, McARDLE 1945, WYNDHAM 1954) verliefen die Änderungen etwas rascher und kontinuierlicher. Der wesentliche Unterschied, eine Phase verzögerter Änderungen in den ersten Tagen, mag damit zusammenhängen, daß unsere Vp kontinuierlich dem feuchtheißen Klima ausgesetzt war. Jedenfalls beobachteten auch SCHMOLL 1967 unter ähnlichen Bedingungen in der Klimakammer und HÖFLER 1966 im natürlichen feuchtheißen Klima ein etwas verzögertes Einsetzen der Akklimatisation.

Diese Fragen sind im einzelnen in einer anderen Arbeit behandelt (LAASER 1968). Ich beschränke mich auf die Erörterung der Veränderungen an Schweissekretion und Schweißverdunstung, d.h. auf die Beantwortung der eingangs gestellten Frage, ob die Zunahme der Schweißmenge zu einer Verbesserung der evaporativen Wärmeabgabe geführt hat.

Daß eine wirksame Akklimatisation eingetreten ist, erkennt man - abgesehen von der eindrucksvollen Besserung der Leistungsfähigkeit - vor allem am Absinken der Körpertemperatur. Auch wenn die während der Arbeit eingetretene Wärmespeicherung kaum geringer geworden ist, so ist doch die Gefahr einer bedrohlichen Hyperthermie beseitigt. Es ist also gar nicht so entscheidend, daß die Verdunstungsgröße mit der Akklimatisation zugenommen hat - tatsächlich kompensiert sie ja auch nur ausreichend die mit dem Sinken der Hauttemperatur verbundene Steigerung der Wärmeaufnahme - vielmehr muß die Verdunstung schon bei einer

niedrigeren Körpertemperatur beginnen und steiler mit der Temperatur verlaufen. Für die Schweißbildung ist dieses Verhalten schon lange bekannt (LADELL 1951) und neuerdings von WYNDHAM 1967 an einem umfassenden Material bestätigt worden. Wir konnten nun mit den vorgelegten Ergebnissen erstmals nachweisen, daß auch die Schweißverdunstung des Akklimatisierten bei einer niedrigeren Körpertemperatur beginnt und bei dieser niedrigeren Temperatur sogar etwas größer ist als vor der Akklimatisation bei höherer Temperatur, obwohl die Verdunstungskapazität kleiner geworden ist.

Die Zunahme der Schweißverdunstung unter diesen erschwerten Bedingungen hat offenbar die für das feuchtheiße Klima charakteristische übermäßige Zunahme der Schweißmenge entsprechend der in Abb. 6 dargestellten Beziehung zwischen V/C und S/C, die mit den Ergebnissen eines Modellversuchs von KERSLAKE 1963 übereinstimmt, zur Voraussetzung. In dem Versuch von KERSLAKE begann das Abtropfen von unverdunstetem Wasser bei S/C 0,4 (bei unserer Vp bei S/C 0,6). Maximale Verdunstung wurde erreicht bei S/C = 2,0 (in unserem Versuch im Mittel bei S/C = 2,4). Die Steilheit der Beziehung zwischen V/C und S/C, oder mit anderen Worten, das Verhältnis von gebildeter und verdunsteter Schweißmenge wird von der räumlichen Orientierung der Verdunstungsflächen und von ihrer Benetzbarkeit abhängen. Bei der verhältnismäßig schlechten Benetzbarkeit der Haut und der überwiegend senkrechten Orientierung der Verdunstungsflächen kann ein die Hautoberfläche kontinuierlich bedeckender Wasserfilm offenbar nur hergestellt werden, wenn die Schweißmenge die Verdunstungsgröße um wesentlich mehr als das Doppelte übersteigt.

Die unverhältnismäßig starke Zunahme der Schweißmenge in einem feuchtheißen Klima ist also ein sinnvoller Vorgang und führt zu einer wirksamen Verbesserung der Wärmeabgabe.

G. LITERATURVERZEICHNIS

BASS, D.E.: Thermoregulatory + circulatory adjustments during acclimatization to heat in man in: Temp. Mes. Contr. Sc. Ind. Vol. 3 part 5. New York: Reinhold (1963)

BAZETT, H.C.: The effects of heat on blood volume and circulation. J. Amer. Med. Ass. 111, 1841 (1938)

BAZETT, H.C. et al.: Amer. J. Physiol. 129, 69 (1940)

BELDING, H.S. + HATCH, T.F.: Relation of skin temperature to acclimatization and tolerance of heat. Fed. Proc. 22, 681-3 (1963)

BÜNING, M.: Die physiologischen Vorgänge bei der Hitzeakklimatisation des Menschen. Diss., Tübingen (1963)

CLIFFORD, I., KERSLAKE, D., McK. and WADELL, I.L.: The effects of wind speed on maximum evaporation capacity in man. J. Physiol. (Lond.) 147, 253 (1959)

COLLINS, K.J., WEINER, J.S.: The effect of heat acclimatization on the activity and number of sweat glands: a study on Indians and Europeans. J. Physiol. (Lond.), 171, 368 (1964)

COLLINS, K.J., G.W. CROCKFORD, J.S. WEINER: The local training effect of secretory activity on the response of eccrine sweat glands. J. Physiol. 184, 203 (1966)

EDHOLM, O.G., R.H. FOX, J.M. ADAM, R. GOLDSMITH: Comparison of artificial and natural acclimation. Fed. Proc. 22, 709 (1963)

EICHNA, L.W., CH.R. PARK, N. NELSON, S.M. HORVATH, E.D. PALMES: Termal regulation during acclimatization in a hot dry (desert-type) environment. Amer. J. Physiol. 163, 585 (1950)

EICHNA, L.W., W.B. BEAN, W.F. ASHE, N. NELSON: Performance in relation to environmental temperature. Bull. Johns Hopkins Hosp. 76, 25 (1945)

FOX, R.H., GOLDSMITH, R., KIDD, D.J., LEWIS, H.E.: Acclimatization to heat in man by controlled elevation of body temperature. J. Physiol. (Lond.) 166, 530 (1963)

FOX, R.H., GOLDSMITH, R., HAMPTON, I.F.G., LEWIS, H.E.: The nature of the increase in sweating. J. Physiol. (Lond.) 171, 368 (1964)

GAGGE, E.M.: Acclimatization to heat and cold. J. Physiol. (Lond.) 110, 330 (1949)

HENSCHEL, A., H.L. TAYLOR, A. KEYS: The persistance of heat acclimatization in man. Amer. J. Physiol. 140, 321 (1943)

HENSCHEL, A., H.S. McPHILMY: Field test methods. In: Environmental Physiology and Psychology in arid conditions. UNESCO 1963

HERTZMAN, A.B., RANDALL, W.C., PREISS, C.N., SECKENDORF: Regional rates of evaporation from the skin at various environmental temperatures. J. Appl. Physiol. 5, 153 (1952)

HÖFLER, W., SCHMOLL, D., R. VOIGT: Verteilung der Schweissekretion auf der Körperoberfläche bei der Hitzeakklimatisation. Naturwissenschaften 53, 506 (1966)

HÖFLER, W.: Verlauf der Hitzeakklimatisation in einem natürlichen tropischen Klima. Z. Tropenmed. Parasitol. 17, 127 (1966)

HOFF, F.: Klinische Physiologie und Pathologie Stuttgart (1954)

KERSLAKE, K.McR.: Errors arising from the use of man heat exchange coefficients in the calculation of the heat exchange of a cylindrical body in transverse wind. In: Temp. Meas. Contr. Sc. Ind. New York Reinhold (1963)

KUNO, Y.: The physiology of human perspiration. London: Churchill (1956)

LAASER, U.R.: Physiologische Reaktionen während eines fünfwöchigen Daueraufenthaltes in einem künstlichen feuchtheissen Klima. Diss. Tübingen 1968. Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 25, 279 (1968)

LADELL, W.S.S.: Assessment of group acclimatization to heat and humidity. J. Physiol. 115, 296 (1951)

LEHMANN, G.: Die Arbeitsfähigkeit des Menschen im tropischen Klima. Veröff. d. A.G.f. Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen Heft 144, Köln Opladen (1965)

LEITHEAD, C.S. a. LIND, A.R.: Heat stress + heat disorders, London, Casell (1964)

LIND, A.R.: Tolerable limits for prolonged and intermitted exposures to heat. In: Temp. Meas. Contr. Sc. Ind. Vol. 3 part 3 New York Reinhold (1963)

LIST, C.F.: Physiology of sweating, Ann. Rev. Physiol. 10, 387 (1948)

McARDLE, B., W. DUNHAM, H.E. HOLLING, W.S.S. LADELL, J.W. SCOTT, M.L. THOMSON, J.S. WEINER: The prediction of the physiological effects of warm and hot environments: the P_4SR index. Med. Res. Council. (London), R.N.P.Rep. 1947/391

McARDLE, B.: Brit. Med. Bull. 3, 175 (1945) Lit. BASS.D.E. 1963

MACPHERSON, R.K.: Physiological responses to hot environment. Med. Res. Counc. Spec. Rep. Ser. No. 298, London 1960

ROBINSON, S., M. NIELSEN, J.W. WILSON: Adaption of white men and negroes to prolonged work in humid heat. Amer. J. Trop. Med. 21, 261 (1941)

ROBINSON., E.S. TURELL, H.S. BELDING, S.M. HORVATH: Rapid acclimatization to work in hot climates. Amer. J. Physiol. 140. 168 (1943)

ROBINSON, S.: Acclimatization of older men to work in heat. J. Appl. Physiol. 20, 583 (1965)

SARGENT, II F., SMITH, CH.R.,BATTERTON, D.L.: Eccrine sweat gland activity in heat acclimatization. Int. J. Biometeor. 9, 229 (1965)

SCHMOLL, D.: Phasen der Akklimatisation an Hitzearbeit während eines dreiwöchigen Daueraufenthaltes in einem feuchtheissen Klima. Dissertation Tübingen 1966

STRYDOM, N.B., C.H. WYNDHAM, C.G. WILLIAMS, J.F. MORRISON, G.A.G. BREDELL, A.J.S. BENADE, M.von RAHDEN: Acclimatization to humid heat and the role of physical conditioning. J. Appl. Physiol. 21, 636 (1966)

TAYLOR, L.H., H.F. HENSCHEL, A. KEYS: Cardiovascuar adjustments of man in rest an work during exposure to heat. Amer. J. Physiol. 139, 593 (1943)

WEINER, J.S.: The regional distribution of sweating. J. Physiol. (London) 104, 32 (1945)

WENZEL, H.G.: Die Beurteilung des Arbeitsklimas. In: Handb. d. ges. Arbeitsmedizin. Bd. I, Berlin-München-Wien 1961

WYNDHAM, C.H.: Effect of acclimatization on circulatory responses to high environmental temperatures. J. Appl. Physiol. 4, 383 (1954)

WYNDHAM, C.H., N.B. STRYDOM, H.M. COOKE, J.S. MARITZ: The temperature responses of men after two methods of acclimatization. Arbeitsphysiologie 18, 112 (1960)

Für die Überlassung des Themas und seine wertvollen Ratschläge danke ich Herrn Dozent Dr. Höfler.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Dr. med. Ulrich Laaser und Fräulein I. Hermann MTA, die mir bei der Durchführung der Versuche sehr behilflich waren.

L E B E N S L A U F

Am 21. 2. 1942 wurde ich, Jacob Erubamy Willie Ladipoh, als Sohn des Automechanikers Joseph Ladipoh und seiner Ehefrau Naomi, geborene Griffin, in Freetown, Sierra Leone, geboren.

Die Reifeprüfung (Higher School Certificate Exam-Advance Level Cambridge) legte ich an der Prince of Wales School Kingtom, Freetown, im November 1961 ab. Von Januar 1962 bis Juni 1962 war ich an der Albert Academy als Hilfslehrer angestellt. Im Juli 1962 kam ich nach Deutschland und nahm im Goethe-Institut in Ebersberg, Oberbayern, an einem Sprachkursus teil.

Am 1. 11. des gleichen Jahres wurde ich an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen für das Fach Humanmedizin immatrikuliert. Das vorklinische Studium wurde im Oktober 1965 mit der ärztlichen Vorprüfung abgeschlossen.
Am 19.2.1969 bestand ich das Medizinische Staatsexamen.